

LA HUMEDAD APROVECHABLE Y SU RELACIÓN CON LA MATERIA ORGÁNICA Y SUPERFICIE ESPECÍFICA DEL SUELO

Available Moisture and its Relation with Organic Matter and Specific Soil Surface

E. Salcedo-Pérez^{1‡}, A. Galvis-Spinola¹, T. M. Hernández-Mendoza², R. Rodríguez-Macias³,
F. Zamora-Natera³, R. Bugarin-Montoya⁴ y R. Carrillo-González¹

RESUMEN

La humedad aprovechable (HA) es una de las variables más significativas del suelo, ya que presenta una relación directa con la productividad de los sistemas agrícolas y forestales. La HA es inherente al tipo de suelo y se modifica por las prácticas agrícolas, por lo que su valor es sitio-específico. Por lo anterior, el propósito de este trabajo fue generar un indicador con base en la medición de la superficie específica (SE) y contenido de materia orgánica (MO) para estimar la HA en suelos de diversas condiciones edafoclimáticas y de manejo. Para ello, en distintos sistemas agrícolas se colectaron 45 muestras de suelos (0-20 cm de profundidad) con origen pedogenético contrastante (Andisoles, Entisoles, Inceptisoles, Mollisoles y Alfisoles) y ambiente (semiárido, subhúmedo y húmedo), de tal manera de asegurar un amplio ámbito de observación. La HA se cuantificó mediante la curva de retención de humedad, la SE con base en la isoterma de Brunauer-Emmet-Teller (BET) y nitrógeno líquido (N₂), y la MO por combustión húmeda. La HA se relacionó significativamente ($P < 0.0001$) con la MO y la SE, donde ambas variables explicaron en 82.8% la variación de la HA, por lo que la SE y la MO constituyen un indicador promisorio para evaluar la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo, en sistemas de producción sometidos a prácticas de manejo y condiciones edafoclimáticas contrastantes.

Palabras clave: fertilidad física, prácticas de manejo, capacidad de almacenamiento de agua.

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (esalcedo@dmcyp.cucei.udg.mx)

² Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, Estado de México.

³ CUCEI, Universidad de Guadalajara.

⁴ Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nayarit.

Recibido: diciembre de 2005. Aceptado: septiembre de 2007.

Publicado en Terra Latinoamericana 25: 419-425.

SUMMARY

The available moisture (HA) is the most significant variable in soils because it is directly related to productivity in agricultural and forest systems. HA is inherent to soil type and is modified by agricultural practices. Therefore, the HA value is site-specific. The aim of this study was to develop a moisture indicator from specific surface area (SE) and organic matter (OM) values, in different soils and under distinct management and climate conditions. In diverse agricultural systems 45 samples were collected at a depth of 0-20 cm from varied soil types (Andisols, Entisols, Inceptisols, Mollisols, and Alfisols) and environment (semiarid, subhumid and humid), in order to assure a wide range of observations. HA was quantified based on the moisture retention curve; the SE based on Brunauer-Emmet-Teller (BET) equation using liquid nitrogen (N₂); and OM by wet combustion. HA was significantly associated ($P < 0.0001$) with OM and SE, which together explained up to 82.8% of the variation. For this reason, SE and OM are promising indicators that can be used to evaluate soil water holding capacity of production systems subjected to contrasting management practices and agroclimatic conditions.

Index words: physical fertility, management practices, water holding capacity.

INTRODUCCIÓN

El agua es retenida en el suelo, principalmente, mediante un proceso de adsorción (potencial matricial) sobre la superficie de las partículas minerales, cuya intensidad de reacción depende de la superficie específica del suelo (SE); la tensión con la que el agua es adsorbida variará según el tipo de suelo, la presencia de materiales orgánicos y el contenido de agua (Pachepsky y Rawls, 1999). La SE se define como el área superficial por unidad de masa o volumen y se expresa en metros cuadrados por gramo (Carter *et al.*,

1986). Además, la SE influye sobre diversas propiedades físicas y químicas edáficas (Hillel, 1998), entre las que destacan la capacidad de intercambio catiónico, la adsorción de contaminantes y plaguicidas (Petersen *et al.*, 1996), la formación de complejos órgano-minerales (Mayer y Xing, 2001), y está íntimamente relacionada con los procesos biológicos que regulan la actividad de los microorganismos (Huang, 2004). El agua atrapada físicamente entre el espacio poroso de la fase sólida edáfica también constituye otro mecanismo por el cual el suelo es capaz de retener humedad, cuya relevancia está circunscrita a suelos con escaso contenido de arcillas (Pachepsky *et al.*, 2001).

El cambio de uso de suelo y las prácticas de manejo agrícola y forestal modifican las propiedades inherentes a su fertilidad física, lo cual repercute sobre el contenido de materia orgánica (MO) y la capacidad de almacenamiento de agua (Browman *et al.*, 1999; Lado *et al.*, 2004), debido a que se modifica la interacción entre las fracciones mineral y orgánica del suelo (Carter, 2004b) y, por ende, el arreglo estructural de las partículas edáficas (Phillips y Young, 1979; Pagliali *et al.*, 2004). Este impacto variará según la SE (Yariv y Michaelian, 2002) y alterará la capacidad productiva del suelo (Carter, 2004a).

Los materiales orgánicos y minerales edáficos están íntimamente relacionados en complejos órgano-minerales (Liebig *et al.*, 2004), donde las moléculas de agua sirven de puentes entre estos dos componentes del suelo (Yariv y Michaelian, 2002). Por lo tanto, los aportes de materiales orgánicos incrementarán el tamaño y la estabilidad de agregados, fomentarán una mayor actividad microbiana y favorecerán la fertilidad física del suelo, en general (Carter y Stewart, 1996); a la vez, se modificará la hidrodinámica y la capacidad del suelo para almacenar agua disponible para los cultivos (Huang, 2004).

La estructura del suelo tiende a colapsarse de manera natural por efecto del agua de lluvia o riego y modifica las propiedades hidráulicas del medio (Or y Ghezzehei, 2002); sin embargo, esto se intensifica significativamente por el laboreo y más aún cuando hay un escaso reciclaje de materiales orgánicos en el agrosistema (Gicheru *et al.*, 2004). Por ello, las prácticas agrícolas constituyen un factor determinante del comportamiento hidráulico del suelo (Kribaa *et al.*, 2001), por lo que es factible mejorar la capacidad productiva a través del incremento de la retención de humedad en el suelo. Para esto es fundamental considerar dentro

del manejo agrícola la aplicación de residuos orgánicos (Francis y Knight, 1993; Moroizumi y Horino, 2004) y fomentar el mantenimiento de la interacción entre las reservas orgánicas y la fracción mineral (Carter, 2004a).

Por lo anterior, el propósito de este trabajo fue generar un indicador para estimar la HA con base en la medición de la SE y el contenido de MO, en suelos de diversas condiciones edafoclimáticas y manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se colectaron 45 muestras compuestas (10 submuestras cada una) a 0-20 cm de profundidad en suelos de diverso origen pedogenético y ambientes contrastantes con el propósito de asegurar un amplio ámbito de observación (Cuadro 1).

En cada ambiente edafoclimático se consideraron diferentes condiciones de manejo o vegetación, esto es: 1) suelos erosionados, presentan baja productividad y nulo reciclaje de insumos orgánicos externos; 2) temporal, terrenos con agricultura de temporal de bajo rendimiento; 3) riego, suelos con uso más intensivo en agrosistemas con riego y alta productividad; 4) suelos de reciente incorporación a la agricultura o explotación pecuaria o forestal, cuyo tiempo transcurrido desde el desmonte haya sido como máximo dos años, o también aquellos terrenos donde se apliquen insumos orgánicos de manera frecuente; 5) ecosistema natural, suelos con vegetación de selva baja y mediana no alterados o modificados por la actividad humana.

Los suelos colectados se secaron al aire y a la sombra, para posteriormente molerlos y tamizarlos con una malla de ≤ 2 mm. Esto tuvo el propósito de homogeneizar los suelos y no limitar la investigación a la dinámica de los flujos sólo a la matriz arcillosa (Huang, 2004).

Mediante la técnica de la olla de presión, se determinaron en todos los suelos estudiados las constantes de humedad de la curva de retención, incluyendo desde saturación hasta la humedad no aprovechable, para calcular la HA (Ordaz, 1999).

La MO se cuantificó por el método Walkley y Black, basado en la oxidación de la materia orgánica de la muestra con un exceso de solución de dicromato de potasio como agente oxidante y titulación con sulfato ferroso de normalidad conocida como agente reductor. La SE se midió con un analizador de superficie (Coulter, modelo SA3100), con la técnica de BET (Brunauer *et al.*, 1938) para nitrógeno líquido (N_2) adaptado para

Cuadro 1. Estado de la República, Méx. ambiente climático, tipo de suelo y manejo o vegetación donde se colectaron las muestras.

Sue- lo	Estado	Ambiente	Suelo	Manejo
1	Veracruz	Trópico húmedo	Andisol	Suelo erosionado
2	Veracruz	Trópico húmedo	Andisol	Suelo erosionado
3	Veracruz	Trópico húmedo	Andisol	Temporal
4	Veracruz	Trópico húmedo	Andisol	Temporal
5	Veracruz	Trópico húmedo	Andisol	Selva alta
6	Veracruz	Trópico húmedo	Andisol	Selva baja
7	Tabasco	Trópico húmedo	Entisol	Temporal
8	Tabasco	Trópico húmedo	Entisol	Temporal
9	Tabasco	Trópico húmedo	Molisol	Reciente incorp.
10	Nayarit	Trópico subhúmedo	Alfisol	Reciente incorp.
11	Nayarit	Trópico subhúmedo	Alfisol	Reciente incorp.
12	Nayarit	Trópico subhúmedo	Alfisol	Reciente incorp.
13	Campeche	Trópico subhúmedo	Alfisol	Reciente incorp.
14	Nayarit	Trópico subhúmedo	Alfisol	Selva baja
15	Nayarit	Trópico subhúmedo	Alfisol	Selva baja
16	Campeche	Trópico subhúmedo	Alfisol	Selva mediana
17	Campeche	Trópico subhúmedo	Alfisol	Selva mediana
18	Campeche	Trópico subhúmedo	Alfisol	Selva mediana
19	Campeche	Trópico subhúmedo	Alfisol	Selva mediana
20	Campeche	Trópico subhúmedo	Alfisol	Selva mediana
21	Nayarit	Trópico subhúmedo	Haplustepts	Suelo erosionado
22	Campeche	Trópico subhúmedo	Haplustepts	Temporal
23	Campeche	Trópico subhúmedo	Dystrustept	Reciente incorp.
24	Campeche	Trópico subhúmedo	Haplustepts	Reciente incorp.
25	Nayarit	Trópico subhúmedo	Molisol	Suelo erosionado
26	Nayarit	Trópico subhúmedo	Molisol	Reciente incorp.
27	Puebla	Zona semiárida	Entisol	Suelo erosionado
28	Nayarit	Zona semiárida	Entisol	Suelo erosionado
29	Nayarit	Zona semiárida	Entisol	Suelo erosionado
30	Nayarit	Zona semiárida	Entisol	Temporal
31	Zacatecas	Zona semiárida	Entisol	Riego
32	Puebla	Zona semiárida	Haplustepts	Suelo erosionado
33	Nayarit	Zona semiárida	Haplustepts	Suelo erosionado
34	Nayarit	Zona semiárida	Haplustepts	Suelo erosionado
35	Puebla	Zona semiárida	Haplustepts	Suelo erosionado
36	Tlaxcala	Zona semiárida	Dystrustept	Riego
37	Tlaxcala	Zona semiárida	Dystrustept	Riego
38	Tlaxcala	Zona semiárida	Dystrustept	Riego
39	Tlaxcala	Zona semiárida	Dystrustept	Riego
40	Tlaxcala	Zona semiárida	Dystrustept	Riego
41	Tlaxcala	Zona semiárida	Dystrustept	Riego
42	Tlaxcala	Zona semiárida	Dystrustept	Riego
43	Tlaxcala	Zona semiárida	Dystrustept	Riego
44	Tlaxcala	Zona semiárida	Dystrustept	Riego
45	Zacatecas	Zona semiárida	Haplustepts	Riego

muestras de suelo. El uso del N₂ en combinación con la ecuación de BET es un procedimiento empleado para obtener la superficie específica de muestras edáficas (Petersen *et al.*, 1996; Mayer y Xing, 2001; Kaiser y Guggenberger, 2003).

La variación de HA, SE y MO se evaluó con base en la prueba de Tukey ($\alpha = 0.10$), considerando como tratamientos el tipo de suelo y la condición de manejo. Además, se realizó un análisis de regresión para conocer el grado de asociación y tendencia entre dichas variables, para evaluar la efectividad de la SE y MO como indicadores de la HA, independientemente del tipo de suelo, clima y manejo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se presentan los resultados del contenido de MO, SE y HA de cada una de las 45 muestras colectadas para llevar a cabo el presente estudio. La variación de la HA, SE y MO agrupadas por tipo de manejo del sistema de producción resultó significativa de acuerdo con el análisis efectuado ($F = 5.51$; $P < 0.0001$).

En el Cuadro 3 se presenta la comparación de los valores de HA, SE y MO agrupadas, según las prácticas de manejo o la vegetación del suelo. Los suelos de vegetación natural, de reciente incorporación a la agricultura, y los agrosistemas irrigados tuvieron valores de HA similares, cuyas diferencias (34 a 38%) no fueron estadísticamente significativas (Tukey, $\alpha = 0.10$).

En contraste, las muestras colectadas en suelos erosionados o con un régimen de temporal estricto tuvieron valores significativamente menores de HA (27% en promedio). Esto se atribuye al diferente reciclaje de materiales orgánicos entre los tipos de suelo, el cual contribuye a incrementar la HA del suelo (Gicheru *et al.*, 2004), donde en la mayoría de los agrosistemas el reciclaje de materiales orgánicos está representado sólo por las raíces del cultivo anterior. En contraste, la variación de la SE por tipo de manejo no fue muy evidente, puesto que esta propiedad es consecuencia del origen pedogenético del suelo, aunque según Lado *et al.* (2004) en casos extremos es factible que sea modificada por procesos erosivos, lo cual coincide con la tendencia observada de la SE en los datos obtenidos en el presente estudio.

El contenido de MO más alto se presentó en los suelos en condición natural y los de reciente incorporación a la agricultura (3.9 y 3.1%) como era de

Cuadro 2. Contenido de materia orgánica (MO), superficie específica (SE) y humedad aprovechable (HA) de las 45 muestras colectadas.

Suelo	MO	SE	HA
	%	m ² g ⁻¹	%
1	2.29	76.1	35.8
2	4.17	59.1	35.1
3	2.69	57.8	36.4
4	5.92	70.3	39.2
5	6.19	52.2	37.2
6	3.5	70.3	38.4
7	0.85	11.3	20
8	1.1	28.4	21.4
9	2.5	80.1	32.9
10	3.8	69.4	32.7
11	2	58.2	34.1
12	2	51	37.9
13	4.02	76	43.9
14	2.3	76.1	32
15	2.2	57.5	32.5
16	7	49.8	46.7
17	3.43	75.1	40.8
18	5.72	86.7	45.6
19	3.43	86.5	37.4
20	3.34	85.2	43
21	0.95	12.6	26
22	1.59	47.2	35.6
23	3.34	54.6	36.9
24	2.65	58.3	34.9
25	1.5	59.2	34.9
26	3.8	61.5	37.5
27	1.45	11	16.9
28	1	20.3	20.2
29	1.5	11.6	18.8
30	0.9	7	18.3
31	0.4	6.7	18.2
32	1.1	38.9	29.8
33	1.3	37.5	25.9
34	1.5	30.1	24.3
35	2.2	81	35
36	2.01	45.9	31.9
37	3.33	66.5	35.1
38	2.46	73.6	37.3
39	1.95	70.7	36.2
40	1.91	65.8	36.7
41	2.63	63.6	40.2
42	2.22	60.4	33.2
43	2.67	64.9	37.3
44	2.97	74.3	36.2
45	1.3	26.6	31.8

Cuadro 3. Variación de la humedad aprovechable (HA), superficie específica (SE) y contenido de materia orgánica (MO) de los suelos agrupando la información según el tipo de manejo del sistema de producción.

Manejo [‡]	HA	Manejo	SE	Manejo	MO
	%		m ² g ⁻¹		%
5	37.7 a [†]	5	69.5 a	5	3.91 a
4	36.3 a	4	59.4 ab	4	3.14 ab
3	34.1 a	3	59.1 ab	2	2.23 bc
2	27.7 b	1	41.5 b	3	2.09 bc
1	26.8 b	2	41.0 b	1	1.70 c
DMS	5.85		22.2		1.18

[†] Los valores de cada columna seguidos por la misma letra no presentan diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0.10$).

[‡] 1 = suelos erosionados; 2 = temporal; 3 = riego; 4 = reciente incorporación a la agricultura o con manejo orgánico; 5 = ecosistema natural; DMS = diferencia mínima significativa.

esperarse, al igual que los valores más bajos de MO estuvieron en los suelos erosionados, lo cual pone en evidencia la escasez de reciclaje de residuos y el impacto negativo de las prácticas de manejo sobre el abatimiento de las reservas orgánicas edáficas. Esto es coincidente con la información reportada por Browman *et al.* (1999), quienes hacen énfasis en el riesgo que implica la escasez de los aportes orgánicos en el sistema de producción.

Los suelos con mayor HA tuvieron los valores más altos de SE y MO, lo cual es coincidente con lo reportado por Liebig *et al.* (2004), quienes lo atribuyen a una interacción positiva entre las partículas de la fracción fina del suelo (> 20 mm) con la MO en complejos órgano-minerales. Por otro lado, una menor HA se debe a una menor capacidad de retención de la misma, por la falta de partículas minerales activas (Yariv y Michaelian, 2002), debido a la disminución de la MO causada por los procesos de mineralización y uso posterior de los cultivos, así como por pérdida del suelo por erosión (Lado *et al.*, 2004). Al igual que en el caso del manejo, la variación de la HA, SE y MO agrupadas por tipo de suelo resultó significativa de acuerdo con el análisis efectuado ($F = 9.98$; $P < 0.0001$). En el Cuadro 4 se presenta la comparación de los valores de HA, SE y MO agrupados por tipo de suelo.

Los suelos con mayor capacidad de retención de humedad fueron el Alfisol, el Andisol, el Mollisol y el Dystrustept, con valores de 39, 37, 35 y 35%, respectivamente, seguido por los Haplustept con 31%, finalmente los de menor HA fueron los Entisoles con promedio de 19%. Estas diferencias se deben al origen pedogenético y a los minerales presentes en cada uno

Cuadro 4. Variación de la humedad aprovechable (HA), superficie específica (SE) y contenido de materia orgánica (MO) de los suelos agrupando la información por tipo de suelo.

Suelo [‡]	HA	Suelo	SE	Suelo	MO
	%		m ² g ⁻¹		%
1	38.8 a [†]	1	70.1 a	2	4.13 a
2	37.0 a	2	64.3 ab	1	3.55 ab
6	35.2 ab	4	63.2 ab	6	3 abc
4	35.0 ab	6	56.6 ab	4	2.5 bcd
5	30.1 b	5	48.8 b	5	1.65 dc
3	19.0 c	3	19.6 c	3	1.08 c
DMS	5.65		19.8		1.54

[†] Los valores de cada columna seguidos por la misma letra no presentan diferencias significativas (Tukey $\alpha = 0.10$).

[‡] 1 = Alfisol; 2 = Andisol; 3 = Entisol; 4 = Dystrustept; 5 = Haplustept; 6 = Mollisol; DMS = diferencia mínima significativa.

de ellos, los que les confieren una determinada capacidad para interactuar con las moléculas de agua y con los componentes orgánicos (Hassink y Whitmore, 1997).

Es importante señalar que se presentaron algunas excepciones en los suelos analizados; por ejemplo, la HA alta en suelos erosionados se debió a que éstos presentan un alto contenido de partículas minerales activas bajo un clima húmedo con mayor producción de biomasa, por lo tanto mayor MO. Por el contrario, el menor valor de HA en suelos de ecosistema natural se debió a que proceden de selva baja subhúmeda caracterizada por una escasa producción de biomasa y, por consiguiente, un menor contenido de MO que retenga la HA.

La SE presentó un arreglo semejante al de HA; los suelos con mayor valor de SE fueron el Andisol, el Alfisol y el Mollisol, con promedios de 70, 64 y 63 m² g⁻¹, respectivamente. Los Dystrustept y Haplustept presentaron valores intermedios de 56.6 y 49 m² g⁻¹ y, por último, los que presentaron el valor más bajo fueron los Entisoles, con 19.6 m² g⁻¹. Estas diferencias tienen fundamento en la presencia de minerales secundarios, como óxidos e hidróxidos de Si, Al, Fe y Mn, que difieren de acuerdo con el tipo de suelo (Tan, 1994), los cuales son responsables de las reacciones coloidales y de conferir las características de superficie específica de los suelos. Por lo anterior, es conveniente precisar que el tipo y contenido de minerales secundarios presentes en cada suelo establecen las características de una SE particular, pero su interacción con los materiales orgánicos (MO) de cada sitio (dinámica y proporción diferente de acuerdo con el tipo de manejo y

vegetación), es lo que determina una capacidad de retención de humedad (HA) propia; las excepciones encontradas, como se mencionó anteriormente, se debieron al origen pedogenético (minerales con mayor actividad de intercambio) o régimen de precipitación (menor producción de biomasa).

En el Andisol se obtuvo el mayor valor de MO (4.1%), seguido por el Alfisol (3.5%); los suelos intermedios fueron el Mollisol, el Dystrustept y el Haplustept, con 3.0, 2.5 y 1.7%, respectivamente, mientras que en el Entisol estuvieron los valores más bajos (1.1%). Según Wattel-Koekkoek *et al.* (2003), el tipo de partículas minerales es un factor determinante de la capacidad para contener por mayor o menor tiempo la MO, debido a su capacidad para protegerla ante el ataque y la descomposición a cargo de la biomasa microbiana (Elliot, 1986; Christensen, 1987, 1992).

Los Alfisoles y los Andisoles presentaron el valor más alto de HA, debido a que presentan una mayor proporción de minerales con alta superficie específica (amorfo y óxidos de Fe y Al) y, por lo tanto, hay mayor cantidad de moléculas de agua que unen dichas partículas (Yariv y Michaelian, 2002). Estos resultados son congruentes con lo presentado por Hillel (1998), quien indica que cuando hay una mayor interacción entre los materiales orgánicos y la matriz arcillosa del suelo se promueve una mejor estructura física edáfica, con más proporción de mesoporos, y se incrementa la capacidad de retención de agua.

Es notorio que el Entisol es el tipo de suelo que presentó los valores más bajos en las tres variables evaluadas, en comparación con los otros cinco tipos de suelo estudiados, seguido del Haplustept. Lo anterior era de esperarse, puesto que se trata de suelos recientes y con menor reciclado de materiales orgánicos por las condiciones climáticas presentes en esos sitios (seco y verano cálido con menor producción de biomasa).

El análisis de regresión de las variables indicó que la HA tiene una relación altamente significativa ($P < 0.0001$) con las variables SE, en su forma logarítmica, y MO, en forma lineal, lo cual permite asegurar que el valor de SE y el contenido de MO de un suelo constituyen variables determinantes para integrar el indicador que permita estimar el nivel de retención de agua por un suelo, independientemente de su tipo o manejo. El valor del modelo permite explicar en 83% el nivel de variación de la HA de los suelos, del cual 71% se debe al valor de SE y 12% al contenido de MO (Cuadro 5).

Cuadro 5. Relación de la humedad aprovechable con la superficie específica (SE) y la materia orgánica (MO) en todos los suelos evaluados. Modelo: $HA = 1.781 + 6.879 \times \ln(SE) + 1.986 \times MO$; $R^2 = 0.8275$; $P > F = < 0.0001$.

Variable introducida	R2 parcial	R2 modelo	Valor de F	$P > F$
Intercepto			0.45	0.5042
SE	0.7094	0.7094	109.87	< 0.0001
MO	0.1181	0.8275	30.13	< 0.0001

La superficie de las partículas de la fracción mineral del suelo juega un papel primordial en la adsorción y desorción de las moléculas de agua (Yariv y Michaelian, 2002) y el contenido de MO se ha propuesto como indicador de la calidad del suelo y la productividad (Cannell y Hawes, 1994), por lo que es posible considerar que la determinación de SE, tanto como la cantidad de MO, constituye una herramienta adecuada para estimar la capacidad del suelo para contener agua disponible para las plantas (HA) y para conocer el grado de modificación por efecto del cambio de uso o manejo, indistintamente del tipo de suelo.

Están documentadas otras formas de estimación y cuantificación de la HA, pero éstas funcionan mejor sólo para un momento específico de la determinación de la HA, mientras que el modelo generado en esta investigación para determinar la HA permite considerar las condiciones que guarda un determinado suelo en un intervalo de tiempo entre una condición de menor a mayor alteración; suelos muy erosionados con baja productividad, con nulo reciclaje de insumos orgánicos externos < terrenos con agricultura de temporal de bajo rendimiento < agrosistemas con riego de alta productividad, con uso más intensivo del suelo < suelos de reciente incorporación a la agricultura o explotación pecuaria o forestal, cuyo tiempo transcurrido desde el desmonte haya sido como máximo dos años, o también aquellos terrenos donde se apliquen insumos orgánicos de manera frecuente < suelos con vegetación natural sin ser alterados o modificados por la actividad humana. Aunque en menor medida, esto también tuvo relación con el tipo de suelo por su capacidad de reacción por los minerales secundarios (Entisol < Haplustept < Dystrustept < Mollisol < Andisol < Alfisol); por lo tanto, el valor estimado presenta mayor utilidad y aplicación, puesto que ofrece una mejor interpretación de las condiciones productivas que guarda un determinado sitio o ecosistema.

CONCLUSIONES

La humedad aprovechable (HA) varió por el tipo de suelo y por el impacto de las prácticas de manejo aplicadas en los agrosistemas evaluados, lo cual se pudo detectar mediante la relación con la superficie específica (SE) y la materia orgánica (MO). Dicha variación se debió a que el tipo y contenido de minerales secundarios presentes en los suelos establecen las propiedades de la SE, pero la interacción con la MO es la que realmente determina el porcentaje de HA para cada tipo de suelo y condición, ya que el manejo aplicado y la producción de biomasa modifican la dinámica de reservas orgánicas en cada sitio y, por lo tanto, la HA. A partir de la medición de dichas variables (SE y MO), se generó un indicador para estimar la HA en suelos de condiciones edafoclimáticas y manejo contrastantes, donde la HA se asoció significativa y positivamente ($P < 0.0001$) con la MO y la SE. Ambas variables explicaron 82.8% la variación de la HA, considerando indirectamente los componentes edáficos y sus interacciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo Mixto Tlaxcala-CONACYT por el apoyo financiero brindado para el desarrollo de este trabajo a través del proyecto TLAX-C02-12933 "Uso eficiente de los fertilizantes para combatir la contaminación de los suelos de Tlaxcala".

LITERATURA CITADA

- Browman, R. A., M. F. Vigil, D. C., Nielsen, and R. L. Anderson. 1999. Soil organic matter changes in intensively cropping dryland systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 186-191.
- Brunauer, S., P. H. Emmett, and E. Teller. 1938. Adsorption of gasses in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.* 60: 309-319.
- Cannell, R. Q. and J. D. Hawes. 1994. Trends in tillage practices in relation to sustainable crop production with special reference to temperature climates. *Soil Tillage Res.* 30: 245-282.
- Carter, D. L., M. Mortland, and W. Kemper. 1986. Specific surface. pp. 413-423. *In*: A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods.* Agronomy 9. Part 1. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.
- Carter, M. R. 2004a. Researching structural complexity in agricultural soils. *Soil Tillage Res.* 79: 1-6.
- Carter, M. R. 2004b. Soil quality as an indicator of sustainable tillage practices. *Soil Tillage Res.* 78: 129-130.
- Carter, M. R. and B.A. Stewart. 1996. *Structure and organic matter storage in agricultural soils.* Lewis/CRC Press. Boca Raton, FL, USA.

- Christensen, B. T. 1987. Decomposability of organic matter in particle size fractions from field soils with straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.* 19: 429-435.
- Christensen, B. T. 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Adv. Soil Sci.* 20: 1-90.
- Elliott, E. T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 627-633.
- Francis, G. S. and T. L. Knight. 1993. Long-term effects of conventional and no-tillage on selected soil properties and crop yields in Canterbury, New Zealand. *Soil Tillage Res.* 26: 193-210.
- Gicheru, P., Ch. Gachene, J. Mbuvi, and E. Mare. 2004. Effects of soil management practices and tillage systems on surface soil water conservation and crust formation on a sandy loam in semi-arid Kenya. *Soil Tillage Res.* 75: 173-184.
- Hassink, J. and A. P. Whitmore. 1997. A model of the physical protection of soil organic matter in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 131-139.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Huang, P. M. 2004. Soil mineral – organic matter – microorganism interactions: fundamentals and impacts. *Adv. Agron.* 82: 391-472.
- Kaiser, K. and G. Guggenberger. 2003. Mineral surfaces and soil organic matter. *Eur. J. Soil Sci.* 54: 219-236.
- Kribaa, M., V. Hallaire, P. Curmi, and R. Lahmar. 2001. Effect of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate. *Soil Tillage Res.* 60: 43-53.
- Lado, M., A. Paz, and M. Ben-Hur. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, soil formation, and soil loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 935-942.
- Liebig, M. A., D. L. Tanaka, and B. J. Wienhold. 2004. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in northern Great Plains. *Soil Tillage Res.* 78: 131-141.
- Mayer, L. and B. Xing. 2001. Organic matter–surface area relationships in acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 250-258.
- Moroizumi, T. and H. Horino. 2004. Tillage effects on subsurface drainage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1138-1144.
- Or, D. and T. A. Ghezzehei. 2002. Modeling post–tillage soil structural dynamics: a review. *Soil Tillage Res.* 64: 41-59.
- Ordaz, V. M. 1999. El agua del suelo y su evaluación. Publicación especial 8. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Estado de México.
- Pachepsky, Y. and A. Rawls. 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer function as affected by grouping soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1748-1757.
- Pachepsky, Y., A. Rawls, and J. Gimenez. 2001. Comparison of soil water retention at field and laboratory scales. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 460-462.
- Pagliali, M., N. Vignozzi, and S. Pellegrini. 2004. Soil structure and effect of management practices. *Soil Tillage Res.* 79: 131-143.
- Petersen, W., P. Moldrup, H. Jacobsen, and D. Rolston, 1996. Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties. *Soil Sci.* 161: 9-20.
- Phillips, S. H. y H. M. Young. 1979. *Agricultura sin laboreo*. Hemisferio Sur. Montevideo, Uruguay.
- Tan, H. 1994. *Environmental Soil Science*. Marcel Dekker. New York, NY, USA.
- Yariv, S. and K. H. Michaelian. 2002. Structure and surface acidity of clay minerals. pp. 1-38. *In: S. Yariv and H. Cross (eds.). Organo-clay complexes and interactions*. Marcel Dekker. New York, NY, USA.
- Wattel-Koekkoek, E. J. W., P. Buurman, J. van der Plicht, E. Wattel, and N. van Breemen. 2003. Mean residence time of kaolinite and smectite-associated soil organic matter. *Eur. J. Soil Sci.* 54: 269–278.